



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Experimentální určení nestacionárního teplotního pole

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Stanislav Aleshin**
Vedoucí práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.





Experimental investigation of unsteady temperature field

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **Stanislav Aleshin**
Supervisor: Ing. Petra Dančová, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Stanislav Aleshin**
Osobní číslo: **S12000010**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Experimentální určení nestacionárního teplotního pole**
Zadávající katedra: **Katedra energetických zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Práce je zaměřena na experimentální určení teplotního pole na zahřívané desce, na kterou dopadá impaktní proud. Experimenty budou prováděny metodou termoanemometrie. Součástí práce bude rovněž analýza a zpracování naměřených dat.

Cíle:

1. Provedení rešerše stávajících poznatků o problematice impaktních a syntetizovaných proudů.
2. Teoretický rozbor úlohy z pohledu mechaniky tekutin.
3. Provedení experimentů metodou termoanemometrie.
4. Analýza a shrnutí získaných dat.

Rozsah grafických prací: 5
Rozsah pracovní zprávy: 40 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná
Seznam odborné literatury:

[1] BRUNN, H., H., 1995. *Hot wire anemometry: principles and signal analysis*. Oxford University Press.

[2] GLEZER, A., AMITAY, M., 2002. *Synthetic jets*. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 34, No. 1.

[3] LIENHARDT, J., H., LIENHARD, J., H., 2005. *A heat transfer textbook*. Phlogiston Press, MIT.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petra Dančová, Ph.D.
Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce: 18. listopadu 2015
Termín odevzdání bakalářské práce: 18. února 2017

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 18. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 7.07.2016

Podpis:



Prohlašuji na svou čest, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, dne: 7.7.2016

Stanislav Aleshin



Anotace

Tato bakalářka práce je zaměřena na experimentální určení teplotního pole na zahřívané desce, na kterou dopadá impaktní proud. Výsledkem této práce je určení teplotního pole na desce. Rešerše této práce je věnována především problematice impaktních a syntetizovaných proudů. V teoretické části práce je proveden rozbor dané úlohy z pohledu mechaniky tekutin. Experimenty byly provedeny pomocí termoanemometrie. Jako pracovní tekutina byl použit vzduch.

Pro měření a zaznamenání dat je použito prostředí software StreamWare 3.01, zpracování získaných dat z experimentů je provedeno v sw Microsoft Excel.

Klíčová slova: teplotní pole, impaktní proud, syntetizovaný proud, termoanemometrie, tryska, filmová sonda.

Annotation

This bachelor thesis deals with experimental investigation of the temperature field on a heated wall, on which impact the flow. Evaluation of the heat transfer coefficient is the result of this thesis.

This thesis has two main parts: In the theoretical part, the state of art and theoretical analysis of the problem is described. The practical parts focuses on the experiments carried out with the thermoanemometry method.

Experimental data are acquired in software StreamWare 3.01 and processed in Microsoft Excel.

Keywords: temperature field, impact flow, synthetic jet, thermoanemometry, nozzle, film probe.

Poděkování

Děkuji vedoucí své bakalářské práce paní Ing. Petře Dančové, PhD. Za ochotu, rady a konzultace. Dále děkuji zaměstnancům Katedry energetických zařízení, kteří mi při mém studiu pomáhali radou či odbornou konzultací.

Tato práce vynikla za podpory Grantové agentury, číslo projektu 14-08888S.

Obsah

Seznam použitých veličin	9
Kapitola 1: Úvod	11
1.1 Cíle bakalářské práce	11
1.2 Syntetizovaný proud	11
1.3 Impaktní proud	12
Kapitola 2: Charakteristika syntetizovaného proudu	13
Kapitola 3: Experimentální zařízení a použité metody měření	14
3.1 Popis experimentálního zařízení	14
3.2 Použitá experimentální metoda	17
3.2.1 Termoanemometr	18
3.2.2 Filmová nalepovací sonda	18
3.2.3 Míra (součinitel) přehřátí sondy	20
3.2.4 Kalibrace sondy	20
Kapitola 4: Experimenty	22
4.1 Nastavení anemometru	22
4.2 Kalibrace sondy	22
4.3 Analýza naměřených dat	23
4.4 Přehled parametrů pro analýzu dat	27
Kapitola 5: Závěr	28
5.1 Další směry výzkumu	28
Použitá literatura	29
Přílohy	30

Seznam použitých veličin

A, B, C, D	(1)	Konstanty
a_h	(1)	Míra (součinitel) přehřátí (overheat ratio)
D, d	(m)	Průměr
d_m	(m)	Průměr membrány
d_{wire}	(m)	Průměr drátku sondy
E_{wire}	(V)	Elektrické napětí na drátku sondy
f	(Hz)	Frekvence
h	(W/(m ² · K))	Součinitel přestupu tepla
I	(A)	Elektrický proud
k	(W/(m · K))	Tepelná vodivost
k_p	(N/m ³)	Tuhost budící soustavy
l_{wire}	(m)	Délka drátku sondy
L_0	(m)	Ekvivalentní délka sloupce vytlačené tekutiny
Le	(m)	Ekvivalentní délka
q	(W/m ²)	Hustota tepelného toku
R_a	(Ω)	Elektrický odpor drátku sondy při teplotě okolí
R_{wire}	(Ω)	Elektrický odpor drátku sondy
S_{wire}	(m)	Průřez drátku sondy
T	(s)	Perioda
T_{ambient}	(K)	Teplota okolí
T_{wire}	(K)	Teplota drátku
T_{overhaet}	(K)	Teplota přehřátí drátku, rovnice (4.2)
T_{surface}	(K)	Teplota povrchu zahřívané desky
T_{y^+}	(1)	Teplota vzduchu na vzdálenosti y^+
U_0	(m/s)	Rychlost v otvoru trysky, rovnice (2.2)
x, y, z		Souřadný systém
μ	(Pa · s)	Dynamická viskozita
ν	(m ² /s)	Kinematická viskozita
ρ	(kg/m ³)	Hustota
χ_{wire}	(Ω · m)	Měrný odpor materiálu drátku

POUŽITÉ ZKRATKY

CT	Konstantní teplota (constant temperature)
CTA	Anemometrie za konstantní teploty (constant temperature anemometry)
HWA	Hot wire anemometry
Re	Reynoldsovo číslo
St	Strouhalovo číslo

Kapitola 1: Úvod

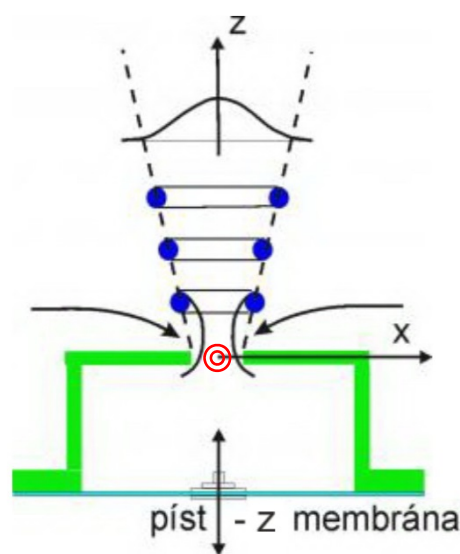
1.1 Cíle bakalářské práce

Bakalářská práce je zaměřena na experimentální určení součinitele přestupu tepla na zahřívané desce, na kterou dopadá syntetizovaný proud z komerční trysky SynJet ZFlow 90 Outdoor Cooler výrobce Nuventix. Experimenty jsou provedeny pomocí metody termoanemometrie a jako měřicí čidlo je použita filmová sonda 55R47 od výrobce Dantec Dynamics. V první části práce je provedena rešerše problematiky syntetizovaných a impaktních proudů a rozbor úlohy z pohledu mechaniky tekutin. Rovněž je zde vysvětlen princip termoanemometrie. V praktické části práce je provedena analýza získaných dat a rozbor výsledků

1.2 Syntetizovaný proud

Syntetizovaný proud (v angličtině *synthetic jet*, lze také přeložit jako skládaný proud) je tekutinový proud, který je generován z periodických pulzací tekutiny. Proud je cyklicky vyfukován a poté opět nasáván vhodným otvorem do dutiny akčního členu, tzv. aktuátoru. V ose z přímo ve výstupním otvoru akčního členu (viz červená značka) lze časově střední průtok považovat za nulový, avšak mimo tuto značku již časově střední průtok nulový není.

Cyklus syntetizovaného proudu začíná pohybem membrány z nulové polohy směrem k výstupnímu otvoru (ve směru $+z$, viz obr. 1), kdy dochází k vytlačování tekutiny z akčního členu. Po dosažení maximální výchylky se membrána začíná pohybovat směrem dolů a dochází tak k nasávání tekutiny do akčního členu. Při největší výchylce membrány ve směru $-z$ se nasávání zastaví, membrána se opět začíná pohybovat směrem k výstupnímu otvoru a celý cyklus se opakuje. Největší rychlosti nasávání a vytlačování je dosaženo v pozici nulové výchylky membrány. Ve fázi vyfukování se na hraně výstupního otvoru tvoří víry, které jsou



Obr. 1: Princip syntetizovaného proudu, [12]

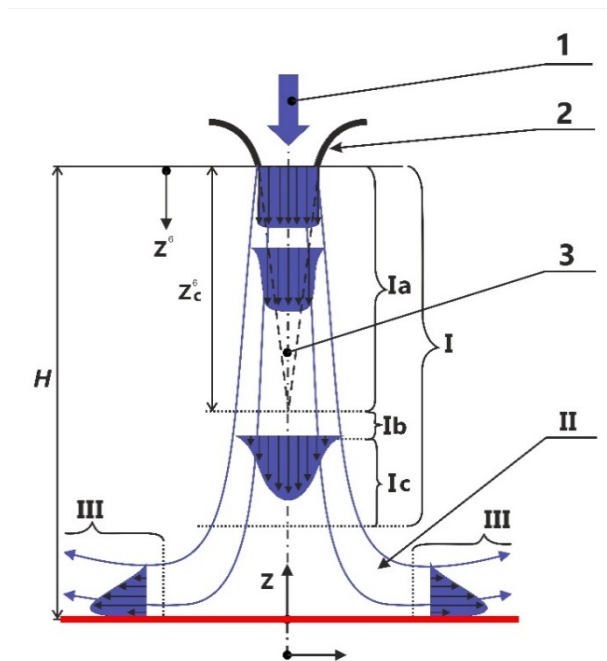
postupně od akčního členu unášeny ve směru osy z , viz obr. 1, [12]. Rychlost unášení vírů musí být dostatečně velká, tak aby tyto vírové struktury byly při dalším cyklu dostatečně vzdáleny od výstupního otvoru a nedošlo k jejich opětovnému nasátí zpět do akčního členu v následující fázi nasávání.

Mezi výhody syntetizovaného proudu patří generování proudu bez dalšího přívodu tekutiny. To znamená, že je eliminována potřeba potrubí pro přívod tekutiny. Akční člen syntetizovaného proudu dává možnost mít proud pracovního média k dispozici na právě požadovaném místě, [12].

1.3 Impaktní proud

Výraz impaktní proud vznikl z anglického označení *impinging jet* a označuje proud, který na něco dopadá, např. na zahřívanou stěnu. Impaktní proudění pak označuje komplexní proudové pole, které je vytvářeno soustavou impaktních proudů, často ovlivňované způsobem odvodu tekutiny od obtékané stěny, [11].

Impaktní proud (obr. 2, [11]) má tři hlavní části: I. proud neovlivněný stěnou, II. stagnační oblast a III. stěnový proud.



Obr. 2: Schéma impaktního zatopeného proudu:
(1) přívod tekutiny, (2) tryska,
(3) potenciální jádro proudu;

I Oblast proudu neovlivněného stěnou:
Ia počáteční oblast, Ib přechodová oblast,
Ic oblast vyvinutého proudu, II Stagnační oblast,
III Stěnový proud. [11]

Kapitola 2: Charakteristika syntetizovaného proudu

Syntetizovaný proud (SJ), můžeme určit následujícími parametry:

- Průměr výstupního otvoru akčního členu d .
- Ekvivalentní délka sloupce vytlačené tekutiny L_0

$$L_0 = \int_0^T u_0(t) dt \quad (2.1),$$

kde u_0 je rychlost v otvoru trysky, $\frac{T}{2}$ je čas vytlačování a T je perioda pohybu budícího členu.

- časově středovaná rychlost v otvoru trysky v průběhu vytlačování tekutiny U_0

$$U_0 = \frac{L_0}{T} = L_0 \cdot f \quad (2.2),$$

kde $f = \frac{1}{T}$ je frekvence pohybu budícího členu.

- Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{U_0 \cdot d}{\nu} \quad (2.3),$$

kde ν je kinematická viskozita tekutiny.

- Strouhalovo číslo

$$St = \frac{1}{\pi} \frac{f \cdot d}{U_0} = \frac{1}{\pi} \frac{d}{L_0} \quad (2.4).$$

- Vlastní frekvence

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot C} \cdot \frac{d}{d_m} \cdot \sqrt{\frac{k_p}{\rho \cdot Le}} \quad (2.5).$$

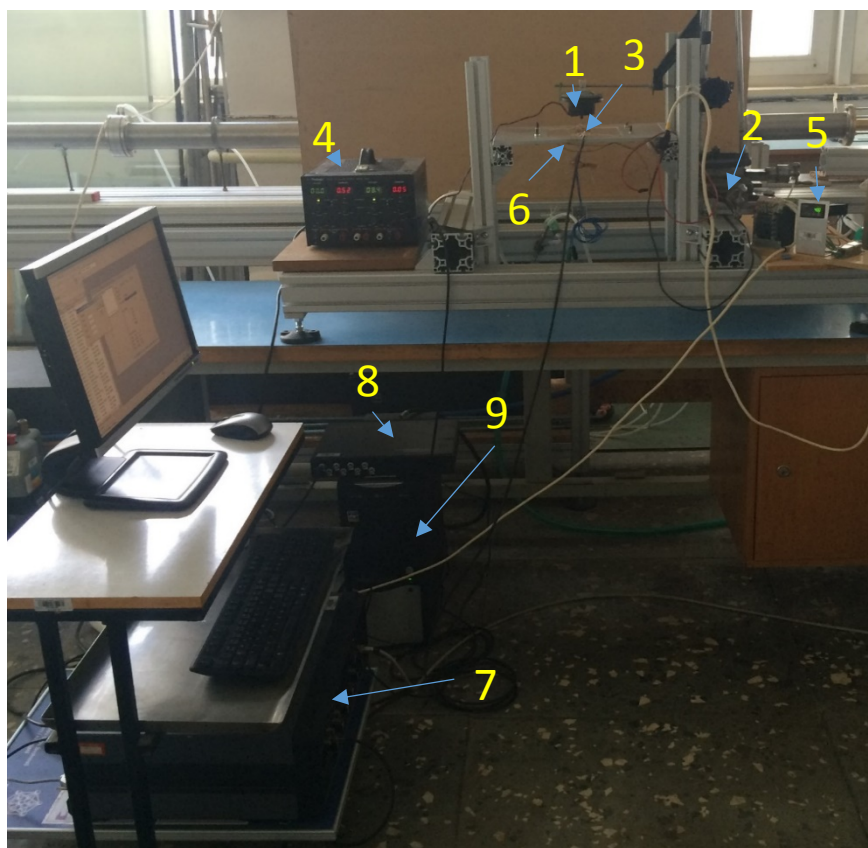
kde C je konstanta, ρ hustota pracovní tekutiny, Le ekvivalentní délka, d_m průměr membrány, k_p tuhost budící soustavy, [3,5].

Kapitola 3: Experimentální zařízení a použité metody měření

3.1 Popis experimentálního zařízení

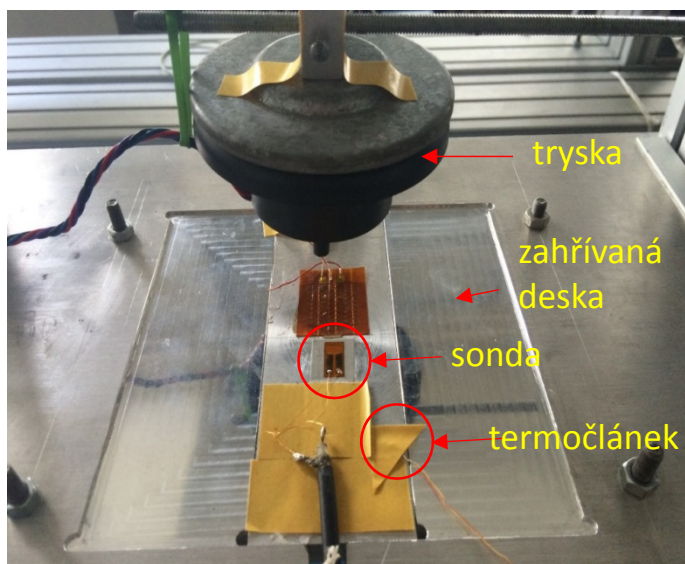
Celé experimentální zařízení je ukázáno na obr. 3 a skládá se z:

1. komerční trysky syntetizovaného proudu,
2. traverzéry umožňující pohyb ve všech třech osách,
3. filmové nalepovací sondy 55R47 od spol. Dantec Dynamics,
4. napájecího zdroje pro trysku syntetizovaného proudu,
5. PID regulátoru CN7523 pro topnou fólii,
6. topné fólie přilepené ze spodu na hliníkovou desku,
7. termoanemometru Dantec 90C10,
8. sběrnice NI-CA1000
9. PC s A/D převodníkem NI-PCI-MIO-16E-1.

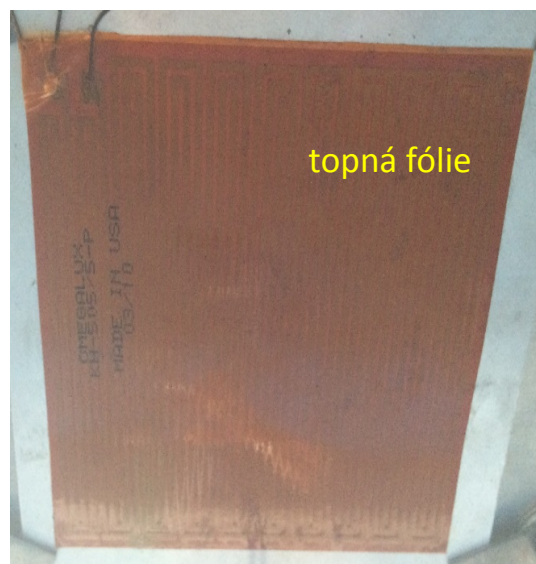


Obr. 3: Experimentální zařízení

Obr. 4 znázorňuje detailní pohled na zahřívanou desku, na které je nalepena filmová sonda (označeno kroužkem), a trysku syntetizovaného proudu, která je obrácena tak, aby na desku dopadal proud z trysky. Na desce je rovněž nalepený termočlánek, který je spojen s PID regulátorem a tak je zajištěno nastavení požadované teploty desky. Obr. 5 zobrazuje topnou fólii přilepenou na spodní stranu hliníkové desky.



Obr. 4: Detailní pohled na zahřívanou desku a trysku SJ

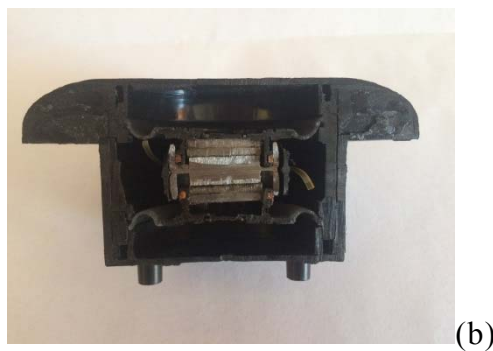


Obr. 5: Pohled na spodní stranu desky s topnou fólií

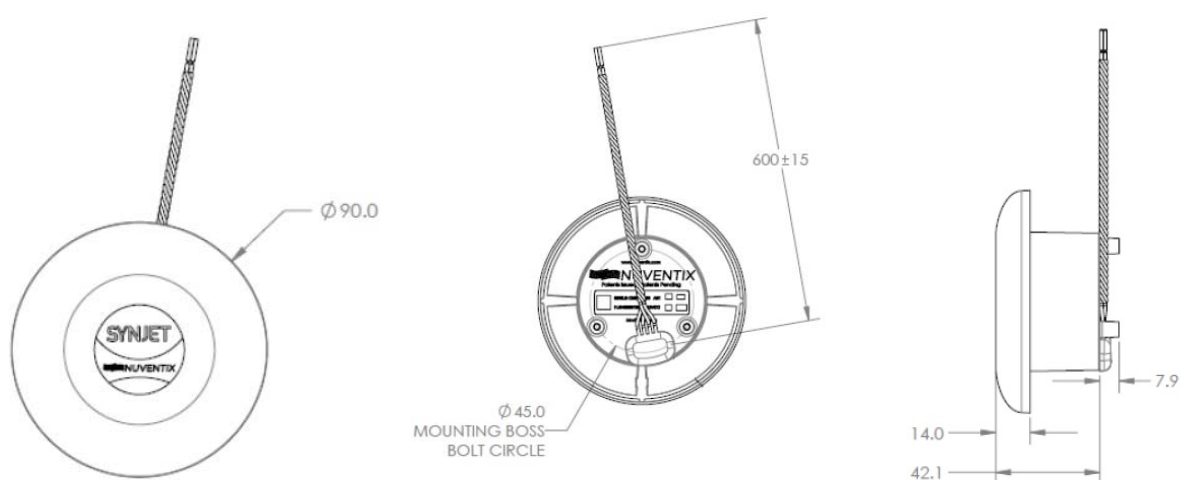
Pro měření syntetizovaného proudu je jako akční člen použita komerční pulzující tryska SynJet ZFlow 90 Outdoor Cooler” (s typovým označením NX200105) od firmy Nuventix, [13], která je zobrazena na obr. 6. Tryska je napájena střídavým elektrickým napětím $U = 8.5 \text{ V}$ a střídavým proudem $I = 0.03 \text{ A}$. Uvnitř trysky je uložen magnet kmitající v dutině trysky a tím nasává a vytlačuje vzduch výstupním otvorem trysky, který je umístěn podél jejího obvodu (viz obr. 6 b). Tryska je upevněna k traverzovacímu zařízení, které umožňuje posuv ve všech třech osách souřadného systému.



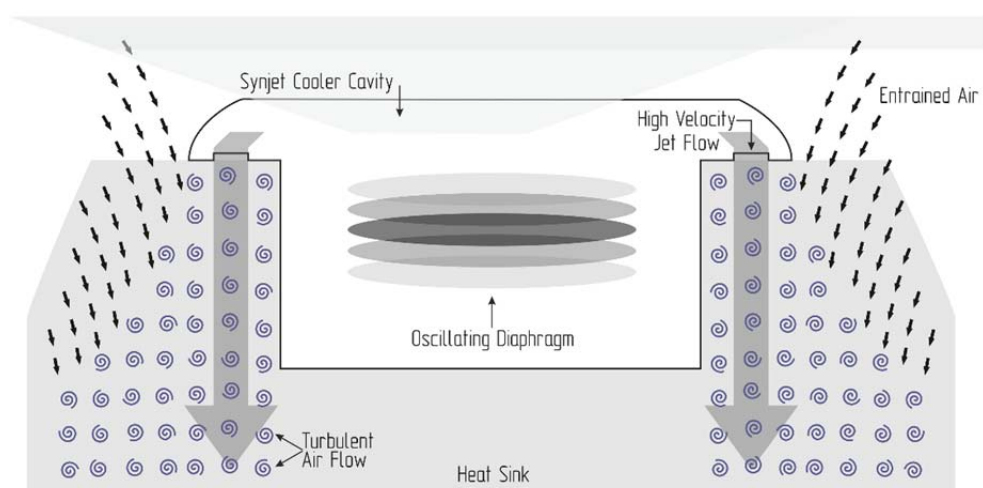
(a)



Obr. 6: Komerční tryska od firmy Nuventix, (a) celkový pohled, (b) detail na vnitřek trysky, [13]



Obr. 7: Geometrie komerční trysky od firmy Nuventix, [13]



Obr. 8: Princip funkce trysky, [15]

V tabulce 1 jsou obsaženy parametry trysek SJ od spol. Nuventix. Pro experimenty provedené v této práci byla použita tryska typ NX200105.

Tabulka 1: Přehled parametrů trysek Nuventix, [13]

Part Numbers	Description	Notes
NX200105	SynJet, ZFlow 90, Outdoor, Level Select, 5V, 600 mm wire harness	Hard wired performance settings
NX200106	SynJet, ZFlow 90, Outdoor, PWM, 5V, 600 mm wire harness	Use with PWM input to control performance setting
NX200107	SynJet, ZFlow 90, Outdoor, Level Select, 12V, 600 mm wire harness	Hard wired performance settings
NX200108	SynJet, ZFlow 90, Outdoor, PWM, 12V, 600 mm wire harness	Use with PWM input to control performance setting

3.2 Použitá experimentální metoda

Pro experimenty provedené v této byla použita metoda termoanemometrie, známá rovněž pod názvem anemometrie žhaveného drátku/filmu z anglického *hot wire anemometry* (HWA).

Princip metody je popsán v knize *Hot wire anemometry: principles and signal analysis* autora H. H. Brunn, [2].

Tato metoda se používá pro měření rychlostních a teplotních polí v tekutinách a je vhodná pro měření turbulentních veličin a flukтуаčních rychlostí proudění, [2,3].

Metoda je založena na konvektivním přenosu tepla ze zahřívajícího tělesa (drátku sondy) umístěného do proudu okolní tekutiny, přičemž přestup tepla závisí na rychlosti proudění a teplotě tekutiny, [3].

Hlavní část měřicího obvodu je sonda, drátková nebo filmová, jejíž důležitou částí je drátek, ve kterém při průchodu elektrického proudu vzniká Jouleovo teplo (rovnice (3.1):

$$d\dot{Q}_J = \frac{I^2 \cdot \chi_{\text{wire}}}{S_{\text{wire}}} dx \quad (3.1)$$

kde I je elektrický proud, χ_{wire} je měrný odpor materiálu drátku při teplotě drátku T_{wire} a S_{wire} je průřez drátku, [2,3].

Ve stacionárním případě celkové Joulovo teplo $d\dot{Q}_J$ generované v drátu o délce dx je rovno teplu přenesenému konvekcí do okolí $d\dot{Q}_{\text{konv}}$, teplu přenesenému kondukcí do držáku $d\dot{Q}_{\text{kond}}$, teplu vyzářenému do okolí $d\dot{Q}_{\text{rad}}$ a teplu akumulovanému $d\dot{Q}_{\text{ac}}$, [2,3]:

$$d\dot{Q}_J = d\dot{Q}_{\text{konv}} + d\dot{Q}_{\text{kond}} + d\dot{Q}_{\text{rad}} + d\dot{Q}_{\text{ac}} \quad (3.2)$$

Teplo odvedené do okolí radiací je ve většině případů zanedbatelně malé a teplo odvedené z drátku do držáku můžeme považovat za nezávislé na parametrech proudícího média. Teplo akumulované lze rovněž zanedbat. Konvektivní přenos tepla do proudícího média můžeme formulovat pomocí Newtonova zákona jako, [2,3]:

$$d\dot{Q}_{\text{conv}} = \pi d_{\text{wire}} \alpha (T_{\text{wire}} - T_a) \cdot dx \quad (3.3)$$

Za předpokladu nekonečně dlouhého drátku sondy, lze rovnici (3.3) přepsat na následující vztah, [2,3]:

$$I^2 R_{\text{wire}} = \pi d_{\text{wire}} l_{\text{wire}} \alpha (T_{\text{wire}} - T_a) \quad (3.4),$$

Po úpravách dle [2] či [3] lze rovnici (3.4) přepsat na:

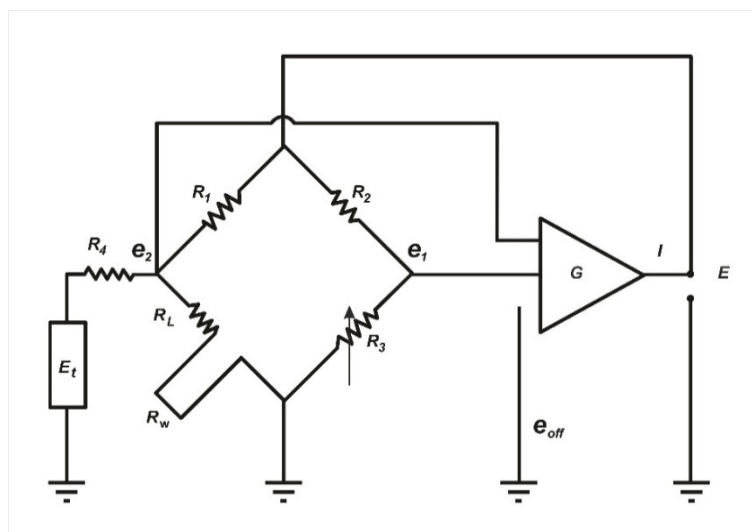
$$\frac{E_{\text{wire}}^2}{R_{\text{wire}}} = (A + B \cdot U^n) \cdot (T_{\text{wire}} - T_a) \quad (3.5),$$

kde A , B , n jsou funkcemi průměru drátku, materiálových vlastností a okolní tekutiny, které lze získat kalibrací, [2,3].

3.2.1 Termooanemometr

Měření bylo provedeno v režimu CTA – *constant temperature anemometry*, to znamená, že na drátku sondy, která je umístěna v tekutině, je udržována konstantní teplota. Se změnou rychlosti proudící tekutiny dochází ke změně konvekčního přenosu tepla na drátku a tím ke změně napětí, přímo úměrnému odporu drátku. Přestup tepla je primárně závislý na rychlosti tekutiny. Údaj o změně napětí je přenášén do zesilovače, kde je regulován napájecí proud tak, aby teplota drátku byla konstantní.

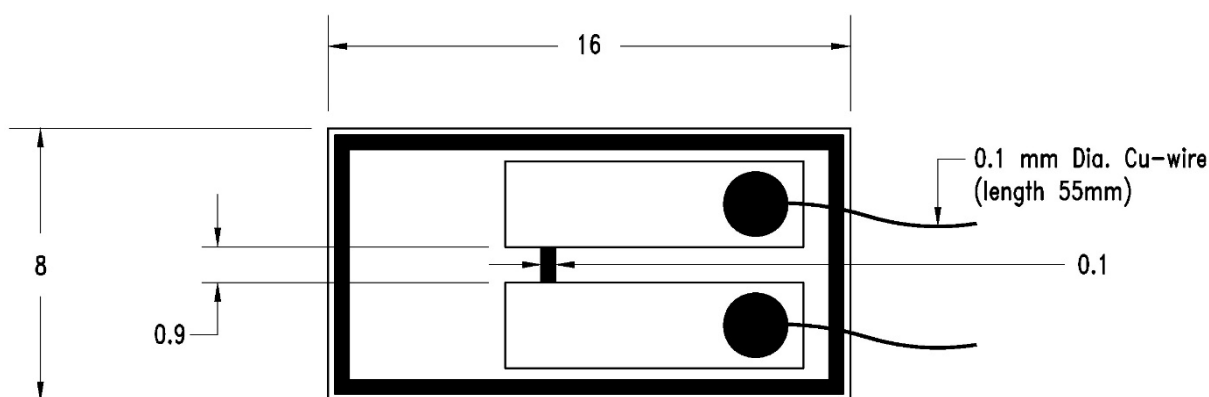
Obr. 9 je vidět schéma pro zapojení Wheatstonova můstku pro režim CTA.



Obr. 9: Schéma pro zapojení Wheatstonova můstku, režim CTA

3.2.2 Filmová nalepovací sonda

Pro experimenty byla použita filmová nalepovací sonda s označením 55R47 (obr. 10) od společnosti Dantec Dynamics, [14]. Sonda se skládá z niklového drátku o rozměrech (0.9×0.1) mm, který je z každé strany propojen do zabudovaného rovinného držáku (materiál zlato). Z tohoto držáku pak vedou měděné drátky o průměru 0.1 mm a délce 55 mm, které lze následně spojit (napájet) s kabelem, který vede do termoanemometru. Celá sonda, resp. drátek a zabudovaný držák jsou zality ve fólii Kapton™ o tloušťce 50 μm .



Obr. 10: Nalepovací filmová sonda 55R47 od firmy Dantec Dynamics, [14]

Sonda je určena především pro kvalitativní měření bodů přechodu a separace. Sonda je připevněna na ploše přímo v místě, kde je prováděno měření.

V případě, že se sonda používá pro kvantitativní měření, musí být kalibrována v místě, kde je připevněna, protože za normálních okolností ji nelze odstranit a přelepit na jiné místo.

V tabulce 2 jsou uvedeny parametry použité sondy.

Tab. 2: Technická data nalepovací filmové sondy, [14]

Tloušťka filmu, do kterého je zalitá sonda	0.5 μm
Pracovní médium	Air
Materiál drátku sondy	Nickel
Rozměry drátku	0.9 x 0.1 mm
Odpor drátku při 20°C R20 (cca)	15 W
Teplotní koeficient odporu udávaný výrobcem Temperature coefficient of resistance (TCR) α 20 (approx.)	0.40%/°C
Maximální teplota drátku	200°C
Maximální teplota okolí	120°C

3.2.3 Míra (součinitel) přehřátí sondy

Míra přehřátí (*overheat ratio*) a_h je měřítkem pro nastavení teploty drátku sondy. Dle [2 a 3] pro režim CT platí zvolit součinitel přehřátí co nejvyšší (maximální hodnoty jsou však omezeny materiálovými vlastnostmi drátu, zvláště pak zvýšenou náchylností ke korozi za vyšších teplot). Pro měření v tekutinách je však hodnota míry přehřátí sondy omezena bodem varu dané tekutiny, respektive teplotou, při které na sondě vznikají bublinky plynu vytvořené buď kavitací, při vysokých rychlostech proudění, nebo varem, při vysokých přehřátích.

Míru přehřátí lze vyjádřit vztahem:

$$a_h = \frac{R_{\text{wire}}}{R_a} \quad (3.6),$$

kde R_{wire} (Ω) je elektrický odpor drátku sondy a R_a (Ω) pak elektrický odpor drátku sondy při teplotě okolí, [2, 3].

3.2.4 Kalibrace sondy

Pro získání kvalitních výsledků je důležité provést kalibraci sondy.

V této práci je provedena teplotní kalibrace sondy, pro kterou lze použít lineární vztah:

$$T = A \cdot E + B \quad (3.7),$$

kde T (K) je teplota, E (V) napětí v drátku sondy a A a B jsou kalibrační konstanty.

Kapitola 4: Experimenty

4.1 Natavení anemometru

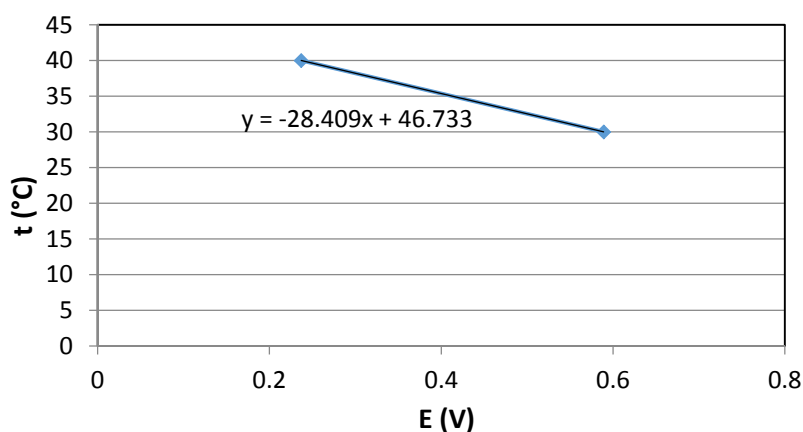
Tabulka 3 uvádí hodnoty nastavené na anemometru a Wheatstonově můstku.

Tab.3: Nastavení anemometru

A/D měřicí karta: NI AT-MIO-16E-1		
Sonda od firmy Dantec Dynamics 55R47		
Parametry můstku		
Odpor můstku	20	[Ω]
Celkový odpor	11,839	[Ω]
Odpor senzoru	11,439	[Ω]
Decade resistance	250,507	[Ω]
Odpor kabelu	0,2	[Ω]
Součinitel přehřátí	0,06	[-]
Teplota okolí	23	[C]

4.2 Kalibrace sondy

Protože ze vzorce (3.7) vyplývá, že pro teplotní kalibraci sondy platí lineární závislost teploty na napětí v drátku sondy, stačilo naměřit napětí pouze pro 2 různé teploty, v našem případě pro 30 °C a 40 °C (viz obr. 11). Z rovnice přímky pak byly vypočteny kalibrační konstanty: $A = -28.409$, $B = 46.733$.



Obr. 11: Data získaná z kalibrace sondy

4.3 Analýza naměřených dat

Pro zpracování dat se vycházelo ze článku *Measurement of Convective Heat Transfer Using Hot Film Sensors: Correction for Sensor Overheat* autorů J. W. Scholten a D. B. Murray [7], kde tepelný tok byl počítán ze vztahu:

$$q = \frac{k \cdot (T_{\text{surface}} + T_{\text{overhaet}} - T_{y^+})}{y^+} \quad (4.1),$$

kde q (W/m^2) je tepelný tok konvekci, k ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) je součinitel tepelné vodivosti hliníku (materiál desky), T_{surface} (K) je teplota zahřívání desky, T_{overhaet} (K) je teplota přehřátí drátku sondy, T_{y^+} (K) teplota vzduchu ve vzdálenosti y^+ .

Teplotu přehřátí drátku lze vypočítat pomocí následujícího vztahu:

$$T_{\text{overhaet}} = T_{\text{wire}} - T_{\text{ambient}} \quad (4.2),$$

kde T_{ambient} (K) je teplota okolí.

Teplota drátku sondy T_{wire} (K) v rovnici (4.2) se spočítala pomocí vztahu (4.3):

$$T_{\text{wire}} = (A \cdot E + B) + 273,15 \quad (4.3)$$

kde E (V) je napětí na drátku sondy a A , B jsou konstanty získané teplotní kalibrací sondy, které odpovídají hodnotám $A = -28.409$, $B = 46.733$.

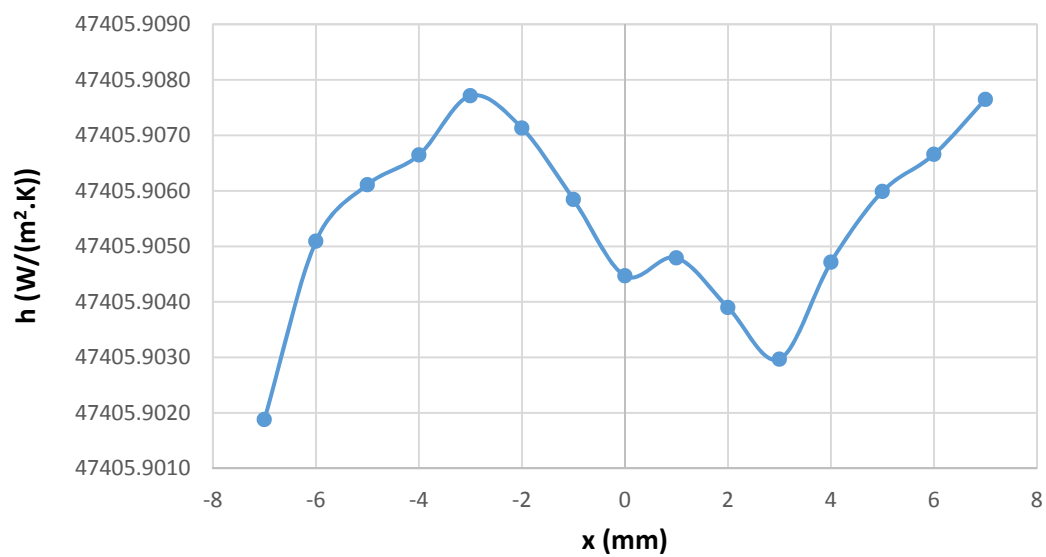
Bylo provedeno 6 druhů měření pro různé parametry, kdy se měnila teplota zahřívání desky (40°C , 45°C , 50°C) a vzdálenost y výstupního otvoru trysky od desky (40 mm, 45 mm).

Vzorkovací frekvence a počet vzorků měření byly 8 kHz a 16384 vzorků. Pro měření byl použit sw StreamWare 3.01, pro zpracování dat pak sw Microsoft Excel.

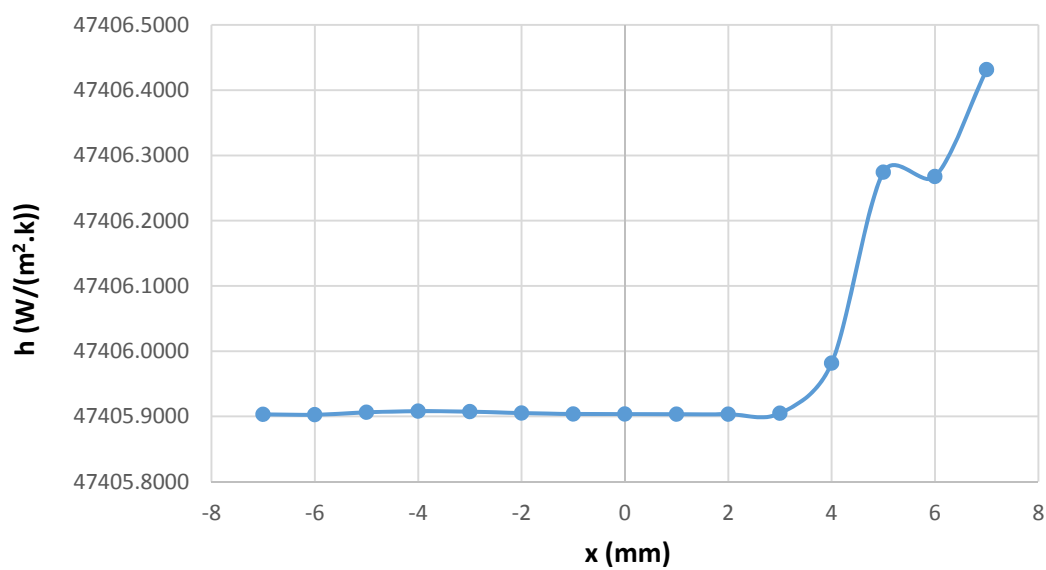
Výsledné hodnoty součinitele přestupu tepla spočtené pomocí rovnice (4.4) ukazují grafy na obr. 12 - 17.

$$h = \frac{q}{(T_{\text{wire}} - T_{\text{ambient}})} \quad (4.4)$$

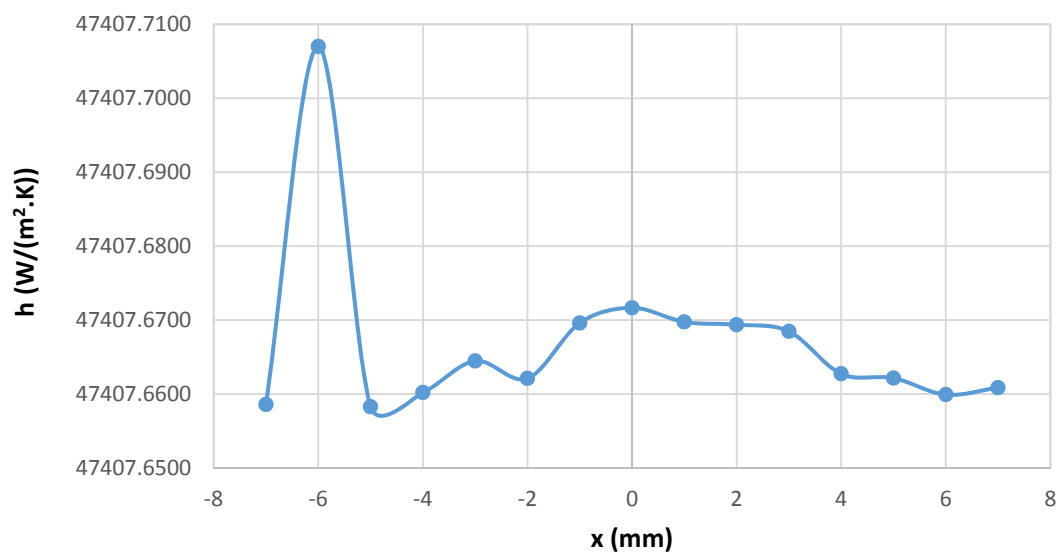
kde jsou h ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) je součinitel přestupu tepla.



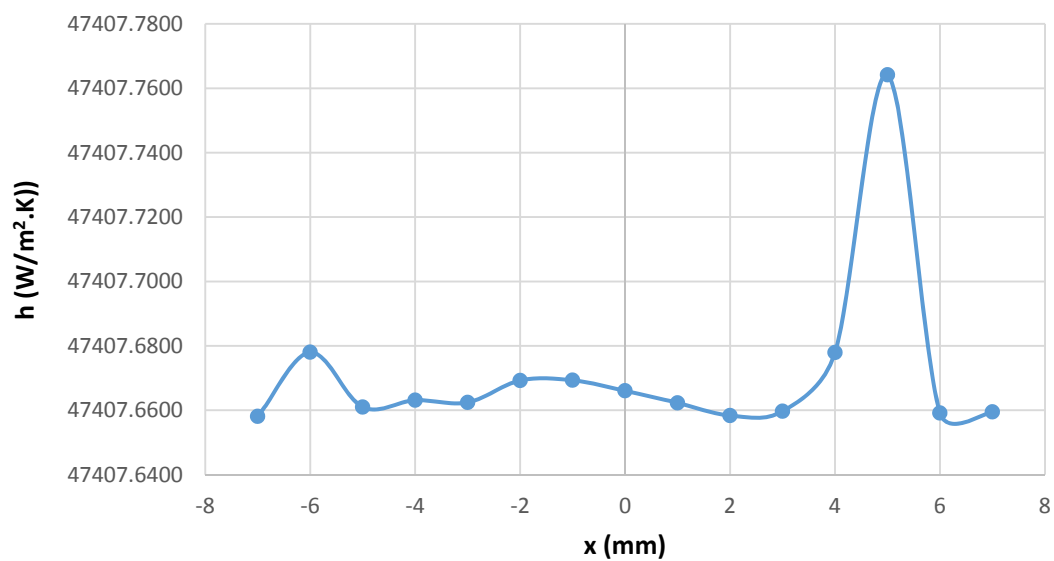
Obr. 12: Součinitel přestupu tepla na zahříváné desce, měřeno při teplotě desky 40 °C, $y = 40$ mm



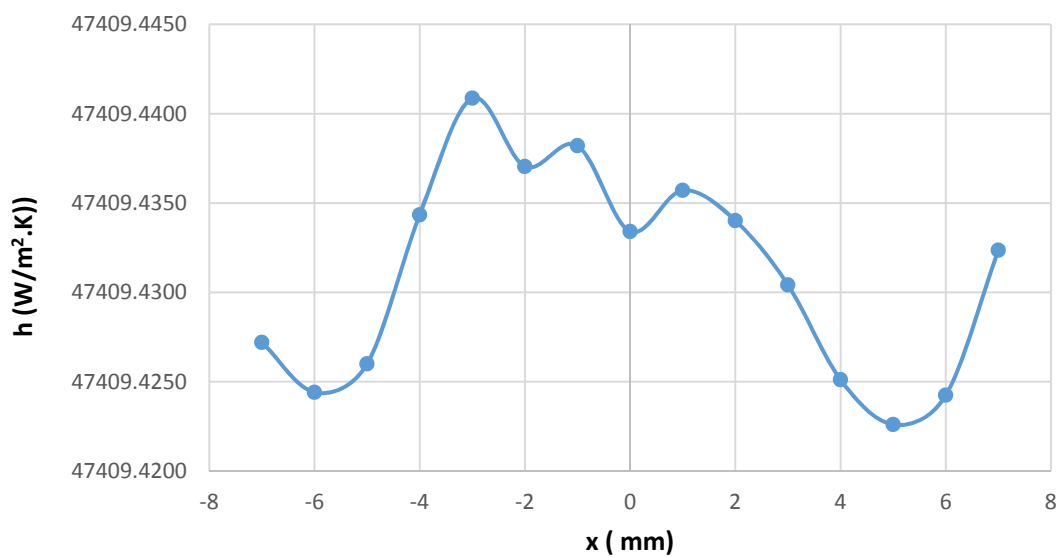
Obr. 13: Součinitel přestupu tepla na zahříváné desce, měřeno při teplotě desky 40 °C, $y = 45$ mm



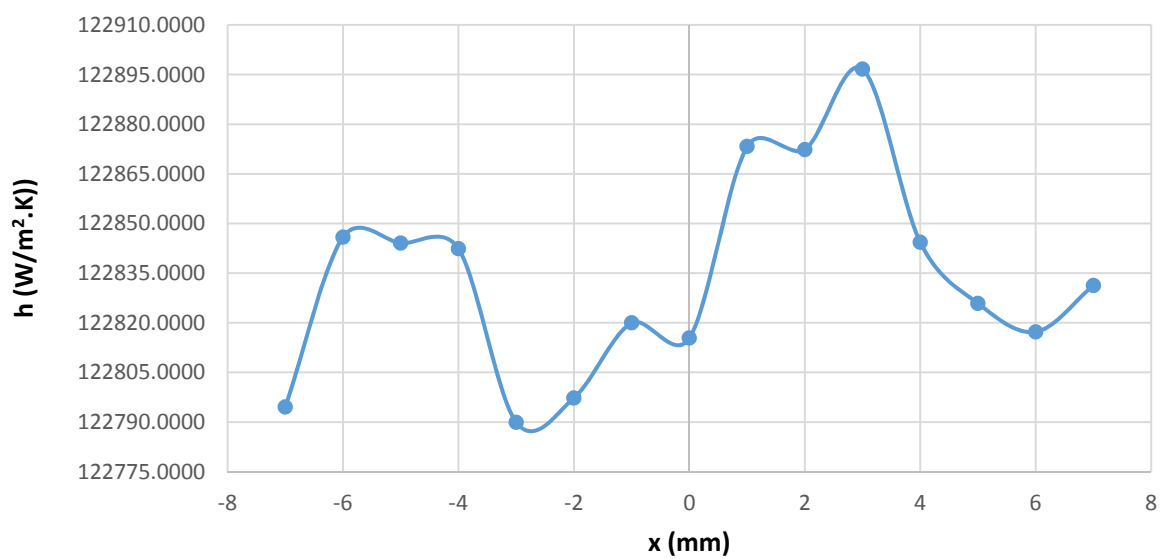
Obr. 14: Součinitel přestupu tepla na zahříváné desce, měřeno při teplotě desky 45 °C, $y = 40$ mm



Obr. 15: Součinitel přestupu tepla na zahříváné desce, měřeno při teplotě desky 45 °C, $y = 45$ mm



Obr. 16: Součinitel přestupu tepla na zahřívané desce, měřeno při teplotě desky 50°C , $y = 40\text{ mm}$



Obr. 17: Součinitel přestupu tepla na zahřívané desce, měřeno při teplotě desky 50°C , $y = 45\text{ mm}$

4.4 Přehled parametrů pro analýzu dat

Následující tabulka shrnuje parametry dosazené do rovnic (4.1) - (4.3). Teploty T_{wire} byly vypočteny pomocí kalibrace a mění se v závislosti na napětí v drátku sondy.

Tab. 4: Parametry použité pro analýzu naměřených dat

Veličina	Jednotka	Hodnota
T_{ambient}	(K)	296
T_{y1}^+	(K)	312.9979
T_{y2}^+	(K)	317.9973
T_{y3}^+	(K)	322.9966
y^+	(mm)	0.005
$T_{\text{surface-1}}$	(K)	313
$T_{\text{surface-2}}$	(K)	318
$T_{\text{surface-3}}$	(K)	323
$T_{\text{wire-1.1}}$	(K)	min 17.04993 – max 17.06659
$T_{\text{wire-1.2}}$	(K)	min 16.05379 – max 17.0646
$T_{\text{wire-2.1}}$	(K)	min 19.99108 – max 17.02075
$T_{\text{wire-2.2}}$	(K)	min 16.7886 – max 17.02115
$T_{\text{wire-3.1}}$	(K)	min 16.94494 – max 16.97779
$T_{\text{wire-3.2}}$	(K)	min 16.95174 – max 16.97574

Kapitola 5: Závěr

Práce byla zaměřena na experimentální určení součinitele přestupu tepla na zahřívané desce, na kterou kolmo dopadá syntetizovaný proud.

Měřicí filmová sonda byla nalepena přímo na zahřívané desce a traverzovalo se tryskou, která byla připevněna na traverzěru, který umožňoval pohyb ve všech třech osách souřadného systému.

Výsledky experimentů jsou uvedeny na obr. 12 – 17. Analýza z naměřených dat byla provedena podle rovnic (4.1) – (4.4), nejprve však musela být provedena kalibrace dle rovnice (3.7).

Naměřená data však ukazují, že proud dopadající na desku, již nemá charakter syntetizovaného proudu, viz např. porovnání s prací [16], kde bylo proměřováno rychlostní pole na té stejné trysce Nuventix.

Toto je způsobeno tím, že sonda již byla umístěna ve velké vzdálenosti od výstupního otvoru z trysky. Blíže se sondu však nedalo umístit, z důvodu velké robustnosti trysky.

Naproti tomu v práci [16] byla tryska umístěna napevno a traverzovalo se drátkovou sondou (typ 55R11) a tak bylo možné sondu přiblížit k výstupnímu otvoru až na vzdálenost 0 mm.

5.1 Další směry výzkumu

Na základě této práce je možné určit směry dalšího výzkumu v oblasti této komerční trysky syntetizovaného proudu.

Protože takto koncipovaná tryska již v nejbližší vzdálenosti, do které lze umístit zahřívanou desku (40 mm od výstupního otvoru), nevykazuje chování trysky syntetizovaného proudu, je nutné ji opatřit žebry, které povedou proud vzduchu na přesně dané místo, kde je potřeba ochlazovat daný prvek (v tomto případě zahřívanou desku).

Použitá literatura

- [1] BAUGHN J.W., SHIMIZU S.: Heat transfer measurement from a surface with uniform heat flux and an impinging jet. Transaction of the ASME, Vol 111, pp. 1096 – 1098 (1989)
- [2] BRUNN H.H.: Hot wire anemometry: principles and signal analysis. Oxford University Press (1995)
- [3] DANČOVA, P.: Studie proudění typu „Synthetic Jet“. Diplomová práce, TUL (2006)
- [4] GLEZER A., AMITAY M.: Synthetic jets. Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 34, No. 1 (2002)
- [5] JORGENSEN F. J.: How to measure turbulence with hot-wire anemometers - a practical guide, DANTEC Dynamics (2002)
- [6] LIENHARDT J.H., LIENHARDT J.H.: A heat transfer textbook. Phlogiston Press, MIT (2005)
- [7] SCHOLTEN J.W., MURRAY D.B.: Measurement of convective heat transfer using hot film sensors: Correction for sensor overheating. Transaction of the ASME, Vol. 118, pp. 982 – 984 (1996)
- [8] SMITH B.L., GLEZER A.: Jet vectoring using synthetic jets. J. Fluid Mech. 458, pp. 1-34 (2002)
- [9] SMITH B.L., GLEZER A.: The formation and evolution of synthetic jets. Physics of Fluid 10, pp. 2281-2297 (1998)
- [10] TRÁVNÍČEK Z., VOGEL J., VÍT T., MARŠÍK F.: Flow field and mass transfer, experimental and numerical studies of a synthetic impinging jet. In: Proc. 4th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT2005), Cairo, Egypt, No. ZT4 (2005)
- [11] TRÁVNÍČEK Z.: Neizotermické úplavy a impaktní proudy: Non-isothermal wakes and impinging jets. Habilitační práce, TUL (2013)
- [12] VÍT T., DANČOVÁ P., TRÁVNÍČEK T.: Syntetizovaný proud (Synthetic Jet). MM průmyslové spektrum: technický měsíčník (3), 2007. Dostupné z <http://www.mmspektrum.com/clanek/syntetizovany-proud-synthetic-jet.html> citováno
- [13] Nuventix: <http://www.aavid.com/sites/default/files/products/led/Aavid-ZFlow90-Outdoor-SynJet-April2015.pdf>, citováno 16.03.2016
- [14] DANTEC 55R47: <http://www.dantecdynamics.com/products-and-services/miscellaneous-probes>, citováno 15.04.2016
- [15] <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2011/oct/advances-in-led-thermal-management>, citováno 21.12.2015
- [16] ŠIMKO M.: Měření nestacionárního rychlostního a teplotního pole, Bakalářská práce TUL, 2015

Přilohy

SynJet ZFlow 90 Outdoor Cooler od firmy Nuventix [13]

Electrical

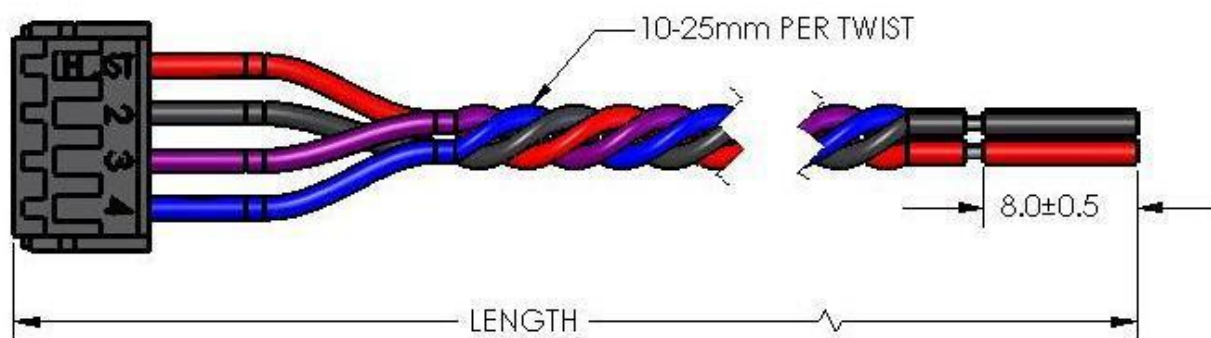
Tabulka 1

SynJet Setting ²	Voltage (VDC) +/-10%	Current (mA) ⁴			Pavg (mW)	Voltage (VDC) +/-10%	Curent (mA) ⁶			Pavg (mW)
		Imin	Iavg	Ipeak			Imin	Iavg	Ipeak	
High Performance	5	20	120	240	600	12	10	67	164	800
Standard			80	160	400			50	100	600
Silent			60	120	300			40	80	480
PWM at 100% duty cycle			160	320	800			82	164	980

Environmental

Tabulka 2

All Settings	Min	Max	Units	Conditions
Operating Temperature	-40	70	°C	Air temperature surrounding cooler
Storage Temperature	-50	75	°C	Air temperature surrounding cooler
Storage Altitude		15K	M	Above sea level
Operating Relative Humidity	5	95	%	Non-condensing
Weight		125	G	SynJey only
Reliability		200K	hrs	L10 @ 60oC, air temperature surrounding cooler
Regulatory Compliance				RoHS, UL, FCC Part 15 Class B, CE






Obr.1. Schema zapojení SynJet ZFlow 90 Outdoor Cooler od firmy Nuventix.

Connector Pinout

Tabulka 3

Pin	Wire Color	Symbol	Description
1	Red	+VDC	5 V or 12 V depending on model
2	Black	GND	Ground
3	Purple	CTRL2	Input for Level Select model Status signal for PWM model
4	Blue	CTRL1	Input for Level Select model PWM input for PWM model

SynJet Setting	SPL(dBA) ³	Wire Connection	
High Performance	28	Red to +VDC Black & Blue to Ground	
Standard	22	Red to +VDC Black only to Ground	
Silent	18	Red to +VDC Black & Purple to Ground	
PWM at 100% duty cycle	28	Red to +VDC Black only to Ground Blue to PWM Signal	